

---

# Ciencia

---

## El origen de la atmósfera y la hidrosfera

MARIO E. TERUGGI

**DOCTOR EN CIENCIAS Naturales** graduado en la Universidad de La Plata en 1946. Nació en Dolores (Pcia. de Buenos Aires) en 1909. Becario del British Council en 1945-46 para estudios de geología y petrografía en la Universidad de Londres. Actualmente es profesor titular de petrografía (primer curso) e interino de petrografía (segundo curso) en la Facultad de Ciencias Naturales de La Plata. Es director del Museo de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia" de Buenos Aires. Miembro de la Asociación Geológica Argentina y de la Geological Society, de Londres. Es miembro consultante del Comité de Ciencias de la UNESCO. Fue delegado del gobierno argentino al Congreso Geológico Internacional de México (1955) y al Seminario Latinoamericano de Museos organizado por UNESCO en Río de Janeiro (1958). Ha publicado más de veinte trabajos científicos, textos y artículos de divulgación. Ha dictado varios cursillos sobre temas de su especialidad.

**L**A opinión que la mayoría de la gente tiene sobre el origen de la atmósfera e hidrosfera (problema de gran importancia que todavía está lejos de hallarse resuelto) deriva casi siempre de una simplificación elemental de la teoría de Laplace-Kant, que puede expresarse en los siguientes términos: A comienzos de su historia, la tierra estuvo en estado de fusión completa, como consecuencia de las altas temperaturas que predominaban en ella al separarse de la hipotética nebulosa primitiva. En ese globo fundido primitivo, el agua y otros componentes más o menos volátiles se evaporaron y constituyeron una envoltura gaseosa caliente, que puede considerarse como la atmósfera primitiva. Con el transcurso del tiempo, el enfriamiento paulatino de la tierra trajo como resultado, después de numerosas refusiones, la formación de una corteza rocosa sólida (la litosfera). Sobre esta corteza, al descender aún más la temperatura, cayeron las aguas calientes resultantes de la condensación del vapor atmosférico,

las que, al acumularse en las depresiones de la superficie terrestre, originaron los primeros océanos y mares (o sea parte de lo que modernamente se denomina hidrosfera, pues en este concepto se incluyen no solo las aguas oceánicas, sino también las de ríos, arroyos, lagos, lagunas, marjales e inclusive las napas subterráneas). La parte gaseosa de la atmósfera quedó como tal, una vez condensado gran parte del vapor de agua, y en esta forma ha llegado hasta nuestros días. Dicho de otro modo, hidrosfera y atmósfera son simplemente la herencia que nos ha quedado de una protoatmósfera caliente: la primera originada por condensación del excesivo vapor de agua, y la segunda por acumulación del residuo gaseoso.

No obstante su carácter hipotético, aparentemente muy lógico y plausible, este cuadro sencillo atrae y estimula la imaginación popular. Sin embargo, debe señalarse que este modo de origen de atmósfera e hidrosfera está íntimamente ligado a una hipótesis cosmogónica no demostrada, o sea que la tierra tuvo un estado primero de fusión; además, tal génesis de nuestras envolturas líquida y gaseosa, respectivamente, nunca ha sido sometida a pruebas científicas rigurosas. Con todo, es un problema de enorme importancia, por el cual se interesan un conjunto de ciencias muy dispares, particularmente geología, geoquímica, hidrología, meteorología, astronomía, oceanografía, sismología, física y muchas otras. Por este motivo, en los últimos veinte años, numerosos investigadores han encarado con variados métodos este problema y ya van apareciendo algunos ligeros adelantos que, aunque pequeños, tienden a aclarar esta cuestión. Sobre estas bases modernas, ha comenzado a cobrar cuerpo una teoría nueva que, aunque aparentemente extraña, parece concordar mejor con los hechos conocidos.

Con el objeto de ilustrar sobre la nueva teoría, pasaremos a considerar primero las hipótesis principales sobre la constitución química de la atmósfera primitiva, y luego analizaremos las bases de las nuevas ideas.

## CIENCIA

### PROBABLE CONSTITUCIÓN DE LA PROTOATMÓSFERA.

Los argumentos principales se han obtenido a partir de datos geológicos y geoquímicos, según han sido analizados por el geólogo norteamericano Rubey.

Estudios recientes sobre la composición del agua de mar y de las rocas sedimentarias antiguas han puesto de manifiesto que muchos de los elementos químicos que entran en su constitución, tales como silicio, aluminio, hierro, calcio, magnesio, sodio y potasio, han derivado de la descomposición de otras rocas de la corteza terrestre. Esta descomposición se efectúa por la acción de la atmósfera sobre el material pétreo —lo que técnicamente se denomina *meteorización*—, que pierde así ciertos componentes que son llevados por los agentes de transporte a las cuencas oceánicas, donde quedan en solución en el agua o se fijan de diversas maneras en los sedimentos que allí se forman. Pero estos mismos estudios también han revelado que, tanto en la atmósfera como en la hidrosfera, existe una cantidad de compuestos y elementos —como el agua, anhídrido carbónico, cloro, nitrógeno, azufre— cuya presencia no se puede explicar a partir del supuesto de que han derivado de la descomposición de rocas preexistentes. Dicho de otra manera, existe un exceso de sustancias volátiles cuyo origen no parece derivar de la meteorización y que, por lo tanto, deben provenir de otra fuente.

La forma más fácil de explicar esta anomalía, aparentemente, es suponer que el exceso actual de volátiles de la atmósfera e hidrosfera constituye el remanente de una cantidad mayor que existió en la atmósfera e hidrosfera primitivas. Es así que en 1899 Lord Kelvin propone la teoría —que sería aceptada por muchos investigadores posteriores— de que la atmósfera primitiva estaría constituida esencialmente por anhídrido carbónico, nitrógeno e hidrógeno sulfurado. Veamos qué sucedería partiendo de semejante composición.

En primer lugar, las aguas de lluvia y de los océanos —en contacto con tal atmósfera— serían muy ácidas, lo que favorecería la descomposición de las rocas desnudas de la corteza, ya que en esas primitivas épocas de la tierra todavía no había aparecido la vida en ninguna de sus formas. Las bases que las aguas extrajeran a las rocas serían lle-

vadas en solución a las cuencas oceánicas, lo que acarrearía una disminución de la acidez y la consiguiente precipitación, bajo condiciones adecuadas de solubilidad, de algunos compuestos que se acumularían sobre los fondos marinos, especialmente el carbonato de calcio, componente principal de las rocas calizas. Pero, la formación de rocas calcáreas, por precipitación química directa, restaría cantidades cada vez mayores de anhídrido carbónico a la atmósfera e hidrosfera; llegaría así un momento en que la concentración de este gas fuese lo suficientemente baja para permitir la aparición de las primeras formas de la vida. Muchas de éstas, a su vez, son extractoras del carbonato de calcio disuelto en las aguas —como muchas algas marinas actuales—, lo que contribuiría considerablemente a la formación de calizas de origen orgánico y empobrecería aún más a la atmósfera en anhídrido carbónico.

Sin entrar ahora en el problema de otros elementos atmosféricos, diremos que el cuadro presentado es teóricamente posible y correcto, pero no ha sido corroborado por observaciones y cálculos recientes. En primer lugar, se ha estimado que, para producir los resultados mencionados, en la primera etapa de evolución de la tierra tendría que haberse alterado una cantidad de rocas superior a la que fué descompuesta por meteorización en toda la historia geológica transcurrida hasta el presente. En segundo lugar, el sodio —que proviene de la meteorización— debería haber alcanzado desde los primeros tiempos una concentración superior a la actual en las aguas de mar, lo cual resulta inaceptable sobre la base de que los ríos modernos aportan anualmente a los océanos una cantidad apreciable de sodio y otros elementos, por lo que sabemos que la salinidad marina ha ido aumentando gradualmente desde el comienzo de la hidrosfera hasta el presente. Por último, y esto es más importante, se tendría que en una atmósfera e hidrosfera ricas en anhídrido carbónico la formación de calizas debería ir disminuyendo paulatinamente con el tiempo, a causa de la continua fijación de ese gas en las rocas (bajo la forma de carbonato de calcio) y su consecuente disminución en las aguas y el aire. Pero la observación geológica demuestra que en el precámbrico (nombre genérico con que se designan las eras Arcaica y Proterozoica, las más antiguas de la historia terrestre) las calizas son raras o faltan por completo, en tanto que en eras posteriores —y especialmente en

## CIENCIA

el Paleozoico y Mesozoico— son mucho más abundantes que en los primeros tiempos de la tierra. Es decir, todo lo contrario de lo que exige la teoría.

Todas estas consideraciones, basadas en estudios detallados que por razones de espacio no es posible analizar aquí, tienden en su conjunto a refutar la posibilidad de la existencia de una protoatmósfera constituida esencialmente por anhídrido carbónico, nitrógeno e hidrógeno sulfurado. Sin embargo, no todos los investigadores aceptaron esta teoría, y particularmente en los últimos veinte años diversos científicos han sostenido que la protoatmósfera estuvo constituida por otros gases, especialmente metano y amoníaco, o una mezcla de ambos. Esta posible composición se basa en una serie de datos, de gran valor científico, entre los que podemos mencionar: 1) en las atmósferas de los planetas mayores (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno), metano y amoníaco son los gases más abundantes; 2) el estudio químico de rocas sedimentarias muy antiguas demuestra que se han originado en ambiente reductor, que bien podría tener la composición mencionada; 3) la síntesis de aminoácidos (precursores de la molécula viva?) mediante descarga eléctrica —comparable a la del rayo— en una mezcla de metano, amoníaco, vapor de agua e hidrógeno indicaría la posibilidad de desarrollo de vida en tal atmósfera.

Aunque la hipótesis de la composición metano-amoníaco de la protoatmósfera se asienta sobre bases muy sólidas, no explica muy bien el citado exceso de volátiles de la atmósfera actual; por otra parte, los escasos datos disponibles sobre la composición de los gases encerrados en los meteoritos demuestran que los más importantes son anhídrido carbónico, monóxido de carbono y nitrógeno molecular, mientras que el metano y el amoníaco son muy raros, lo que no concuerda con la teoría.

Deberá de llamar la atención el hecho de que, en todas estas consideraciones sobre la atmósfera primitiva, nada se haya dicho sobre el oxígeno, elemento atmosférico esencial para la vida. Es éste un problema muy difícil y complejo, de enorme interés para las ciencias biológicas. Los estudios sobre rocas sedimentarias antiguas no son muy concluyentes: por un lado, algunas parecen haberse formado en ambiente reductor, como ya se mencionara, pero otras, en cambio, parecen haberlo hecho en presencia de oxígeno libre pues poseen más

hierro férrico que las rocas ígneas y sulfatos que se consideran provenientes de la oxidación de sulfuros. De esto se desprendería que en la atmósfera primitiva existía una cierta cantidad de oxígeno libre, pero que además había ambientes locales donde faltaba este elemento, ambientes reductores en los cuales pueden haberse originado los primeros organismos.

En la actualidad, el oxígeno libre de la atmósfera se origina por dos procesos: 1) acción fotosintética de las plantas verdes, que libera este elemento a partir del anhídrido carbónico y el agua; 2) fotodisociación del vapor de agua en la atmósfera superior, con el consiguiente escape del hidrógeno de la gravitación terrestre. La cantidad originada por este último proceso sería muy superior a la que se encuentra en la atmósfera actual, pero inferior al total de oxígeno que se ha fijado en las rocas sedimentarias por meteorización a través de todos los tiempos geológicos. De cualquier modo que sea, el oxígeno libre tiene una influencia decisiva sobre algunos de los componentes supuestos de la protoatmósfera, ya que tanto metano como amoníaco son inestables en su presencia, disociándose en anhídrido carbónico y nitrógeno libre, respectivamente. Es posible, por consiguiente, que el oxígeno se haya acumulado lentamente con el correr del tiempo, mediante los dos procesos citados.

Todas estas consideraciones nos demuestran las dificultades que se presentan cuando se parte de una supuesta atmósfera de determinada composición, pues quedan sin aclarar un número considerable de problemas. El exceso de volátiles mencionados aparece sin explicación o con una que es insatisfactoria.

#### LA HIPÓTESIS DE LA "DESGASIFICACIÓN" DE LA TIERRA

En líneas esenciales, esta hipótesis supone que el agua y los volátiles provienen no de una atmósfera primigenia sino de un escape de gases de las rocas del interior de la tierra. Este escape pudo haberse producido a comienzos de la historia terrestre, pero más comúnmente se acepta que se han ido liberando gradualmente, a ritmo más o menos constante, a través de los tiempos geológicos y continuando en el presente. Según esta teoría, la composición de la protoatmósfera deja

## CIENCIA

de ser un problema de gran importancia, si bien se restringen las posibilidades teóricas.

Esta hipótesis, aparentemente tan increíble, se apoya en una serie de datos y consideraciones, entre los cuales mencionaremos los siguientes:

1. — Un grupo apreciable de científicos considera inexacta la teoría de la nebulosa incandescente primitiva y, en su lugar, sostiene que la tierra —y el sistema solar todo— se originó por un proceso de acreción, o agregación, de partículas o polvos que estaban distribuidos por el espacio. Según esta concepción, que se fundamenta en sólidas bases teóricas, la temperatura inicial del globo terrestre tiene que haber sido baja, del orden de los 300 ó 400° K; se admite, sin embargo, que se han producido posteriormente fusiones parciales del globo, provocadas presumiblemente por calor de origen radioactivo.

2. — Los gases que escapan del interior de la tierra, por medio de volcanes, solfataras y fuentes termales, están constituídos predominantemente por vapor de agua, anhídrido carbónico y nitrógeno, o sea los volátiles que se hallan en exceso en la atmósfera e hidrosfera. Queda la incógnita, no obstante, de que estos gases telúricos se hayan formado por reacción de magmas calientes con rocas sedimentarias en las cuales se habían fijado estos componentes por meteorización.

3. — Los gases ocluidos en los meteoritos —ya citados— coinciden en su composición con los de emanaciones telúricas. Este hecho, unido al anterior, tendería a demostrar la predominancia de esos componentes en las atmósferas primitivas.

Aunque estos argumentos son insuficientes para justificar la hipótesis, ésta es la que mejor salva las dificultades mencionadas al tratar la composición de la atmósfera primitiva. Si se acepta que los volátiles se han ido acumulando lentamente en la atmósfera e hidrosfera, desaparecen los problemas de la gran cantidad de rocas que deben meteorizarse y de la concentración del sodio marino. Además, si el anhídrido carbónico se va desprendiendo lentamente de las rocas de la corteza, resultaría que las calizas se irían formando continua y constantemente a través de todos los tiempos geológicos. De este modo, habría existido en todo momento un delicado mecanismo que mantendría el equilibrio entre la cantidad de anhídrido carbónico escapada de la tierra y la que se fija en la producción de calizas, de manera

que este gas se mantuvo siempre en la atmósfera en proporciones más o menos constantes.

Conviene señalar aquí que, si se acepta el origen por acreción de la tierra, es posible que al aglomerarse las partículas sólidas hayan arrastrado consigo, del espacio, una atmósfera muy distinta a la actual. En este caso, y de acuerdo con datos astrofísicos, los elementos fundamentales serían hidrógeno y helio, lo que favorecería la formación de metano y amoníaco. Esta posibilidad no puede ser debidamente apreciada a causa del fenómeno del continuo escape del hidrógeno del campo gravitativo terrestre, y por ello no puede descartarse la hipótesis de que en la tierra existió —aunque más no sea durante un fugaz momento primero— una atmósfera constituida por esos dos gases.

La suposición que acabamos de mencionar deja sin explicar el exceso de volátiles en nuestra atmósfera e hidrosfera; por este motivo, Rubey se inclina a pensar que, en lo que se refiere a esos componentes, la protoatmósfera no debió ser muy distinta de la actual, es decir, constituida esencialmente por anhídrido carbónico y nitrógeno. En cuanto al oxígeno, su formación debe atribuirse a progresiva disociación o a la acción clorofiliana, y su porcentaje en el aire ha de haber aumentado gradualmente; con todo, es posible que haya permanecido más o menos estable en los primeros tiempos de la tierra a causa de la fijación de grandes cantidades de este elemento en la oxidación de las rocas de la litosfera. Los otros dos compuestos citados con relación a la protoatmósfera, metano y amoníaco, no son comunes en ningunas de las emanaciones telúricas estudiadas; el poco de metano presente en nuestra atmósfera ha de estar en proceso de continua formación en pequeña escala —posiblemente por actividad biológica—, que compense su disociación en presencia de oxígeno libre.

Quedan otras pruebas que también tienden a demostrar el origen de la atmósfera e hidrosfera por el proceso de desgasificación de la tierra. Existe en nuestra atmósfera actual un contenido de uno por ciento de argón. Se trata en realidad de un isótopo, el argón 40, distinto del argón 36 que predomina en los espacios cósmicos. Estudios recientes han demostrado que este argón 40 no es primitivo, sino que se origina poco a poco por desintegración de una parte del potasio 40 de la litosfera. Investigaciones efectuadas sobre la composición de los gases de fumarolas y *soffioni* de Lardarello (Italia) han comprobado



## CIENCIA

que contienen una cantidad pequeña de argón 40, que constituye un aporte anual a nuestra atmósfera de  $4,4 \times 10^6$  gramos; sobre esta base se ha calculado que la existencia a través de todos los tiempos de unos mil centros ismílares de emanación serían más que suficientes para engendrar todo el argón 40 presente en la atmósfera actual. He aquí el caso de un componente atmosférico cuyo origen telúrico, por desintegración del potasio 40 de las rocas, no deja lugar a dudas.

Pero existen todavía otras posibilidades. Según el geofísico norteamericano Kulp, el escape del argón 40 a través de la corteza va acompañado de otros efectos importantes. Para este autor, el potasio 40 debe provenir de zonas profundas de la corteza, ya que en las rocas superficiales su porcentaje es muy reducido. Supuestamente, tenemos a esas profundidades temperaturas algo superiores a los  $1.000^{\circ}\text{C}$ , y en esas condiciones el agua no puede ser retenida en las estructuras cristalinas de los minerales, que por estos motivos son siempre anhidros (principalmente olivinas y piroxenos, los dos componentes más citados como integrantes de las rocas profundas). El agua no utilizable en la composición mineralógica de las zonas profundas escapa entonces hacia niveles superiores, y como el tamaño de sus moléculas es similar al de las de argón 40, se supone que ambos componentes emigran juntos hacia la superficie. De este modo, las rocas de los niveles superiores de la corteza estarían continuamente permeados por una nube de vapor de agua, potasio 40 (y su producto de desintegración, el argón 40), anhídrido carbónico, nitrógeno y otros componentes menores. Esta nube de compuestos y elementos, en su paso por las rocas, producen profundas modificaciones en su mineralogía y estructura, y ella es posiblemente la causa de la heterogeneidad petrográfica de nuestra corteza.

Vemos, pues, que la hipótesis de la desgasificación de la tierra concuerda mejor que la clásica con los hechos conocidos. Según ella, atmósfera e hidrosfera no son hijas de una protoatmósfera común, sino de la litósfera, que a través de los tres mil o más millones de años de historia geológica ha ido aportando --por emanaciones gaseosas continuas a través de sus rocas-- cantidades inmensas de vapor de agua, anhídrido carbónico, nitrógeno, argón 40 y otros componentes. La historia de las cubiertas gaseosa y líquida de nuestro globo se halla así íntimamente unida con todos los procesos geológicos creadores de

*Mario E. Teruggi*

la tierra y, más especialmente, de su litosfera. En esta unidad genética de los tres componentes esenciales de nuestro planeta y nuestra vida —roca, agua y aire— hay, según la hipótesis de la desgasificación, una armonía que, sin duda y dejando de lado los fundamentos científicos brevemente mencionados, será más atrayente a la imaginación que otras concepciones previas ampliamente difundidas.